

# ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ РАСЧЕТА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО БАЗАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Ерошко А.А.

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net*

**Введение.** При исследовании гидрофизических, гидрохимических, биологических и экологических процессов в Черном море, необходимы сведения о течениях. Течения осуществляют распределение тепла, соли, живых организмов и загрязнений по всему объему моря. Наиболее полную картину структуры и динамики черноморских течений могли бы дать длительные синхронные наблюдения за ними с помощью измерительных приборов, установленных на долговременных за якоренных или дрейфующих буйковых станциях.

В морском приборостроении немало сделано для решения этой проблемы. Созданы приборы, способные измерять течения на горизонтах буйковых станций и зонды, работающие с борта научно-исследовательского судна на гидрологических станциях. С помощью этих приборов выполнены измерения течений на отдельных исследовательских черноморских полигонах, что дает лишь фрагменты общей циркуляции вод. Сети измерительных станций, покрывающих всю акваторию Черного

моря, в обозримом будущем также не предвидится. Поэтому расчет горизонтальной и вертикальной структуры геострофических течений в Черном море по данным плотностных съемок помогает представить общую динамическую картину Черного моря и получить оценки ее изменчивости во времени и в пространстве.

Опыт, полученный в расчетах геострофических течений на небольших черноморских полигонах и созданное для этих целей методическое и программно-математическое обеспечение (А.А. Ерошко, В.М. Кушнир, А.М. Суворов, 1999) позволяют рассчитать горизонтальную и вертикальную структуру геострофических течений на всей глубоководной части моря.

**Исходные данные.** В качестве исходных данных использовались результаты плотностных съемок в Черном море, проведенных в рамках научных проектов COM'SBLACK (1990, 1992, 1993). Программы выполнялись научными судами Украины и Турции. Первичная информация сдавалась в банк данных Морского гидрофизического института национальной академии наук Украины. Откуда она получена автором. Число гидрологических станций в каждой из съемок равно: COM'SBLACK 90 - 185, COM'SBLACK 92 - 304, COM'SBLACK 93 - 356.

Для автоматизации обработки громоздких и сложных схем плотностных съемок на ПЭВМ было разработано методическое и программно-математическое обеспечение в виде пакета программ. Отметим, что при создании пакета программ, за основу

расчетов скорости и направления геострофических течений, проводимых по результатам плотностных съемок гидрологических полигонов, принят классический динамический метод (Л.М. Фомин, 1964).

Весь процесс обработки делится на этапы, которые в виде блок-схемы изображены на рис.1. Рассмотрим ее подробнее.

**1. Прием исходной информации.**  
Файлы, полученные из банка данных МГИ НАНУ, вводятся в ЭВМ с помощью входных программ пакета. Программы преобразуют и расписывают входную информацию по массивам и файлам, которые согласованы по формату со стандартными графическими пакетами GRAPHER и SURFER и с последующими обрабатывающими программами, для которых эти массивы и файлы являются входными.

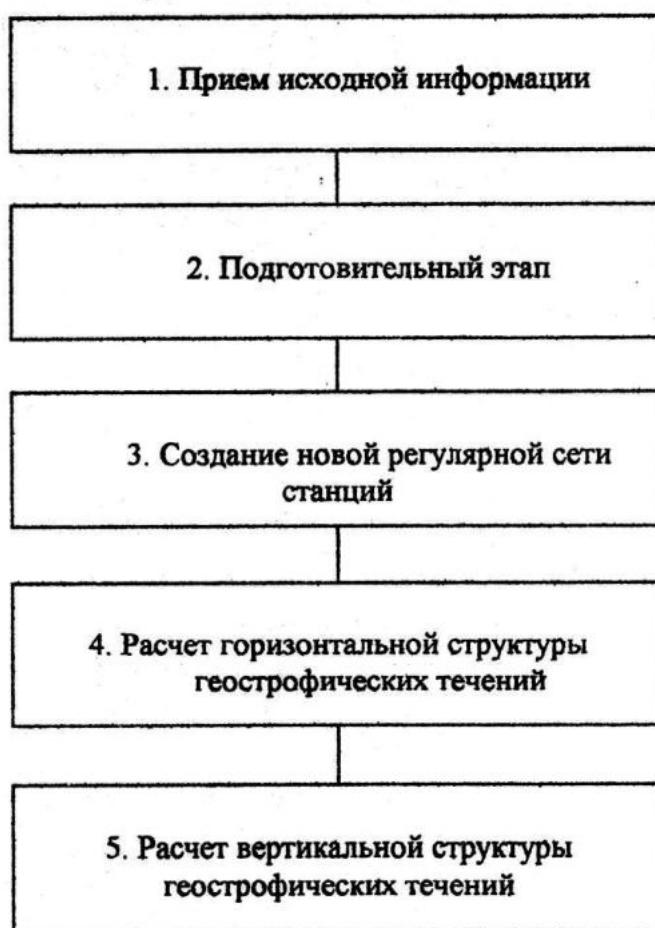


Рис.1 Последовательность расчета структуры геострофических течений в Черном море.

В качестве примера, иллюстрирующего результат работы на этом этапе, на рис.2 приведена схема съемки COM'SBLACK 92, выполненная в июле-августе 1992 г. Большинство гидрологических станций приходится на глубо-

ководную часть акватории моря, остальные расположены в его мелководной северо-западной части. Подобным образом выглядят схемы двух других съемок.

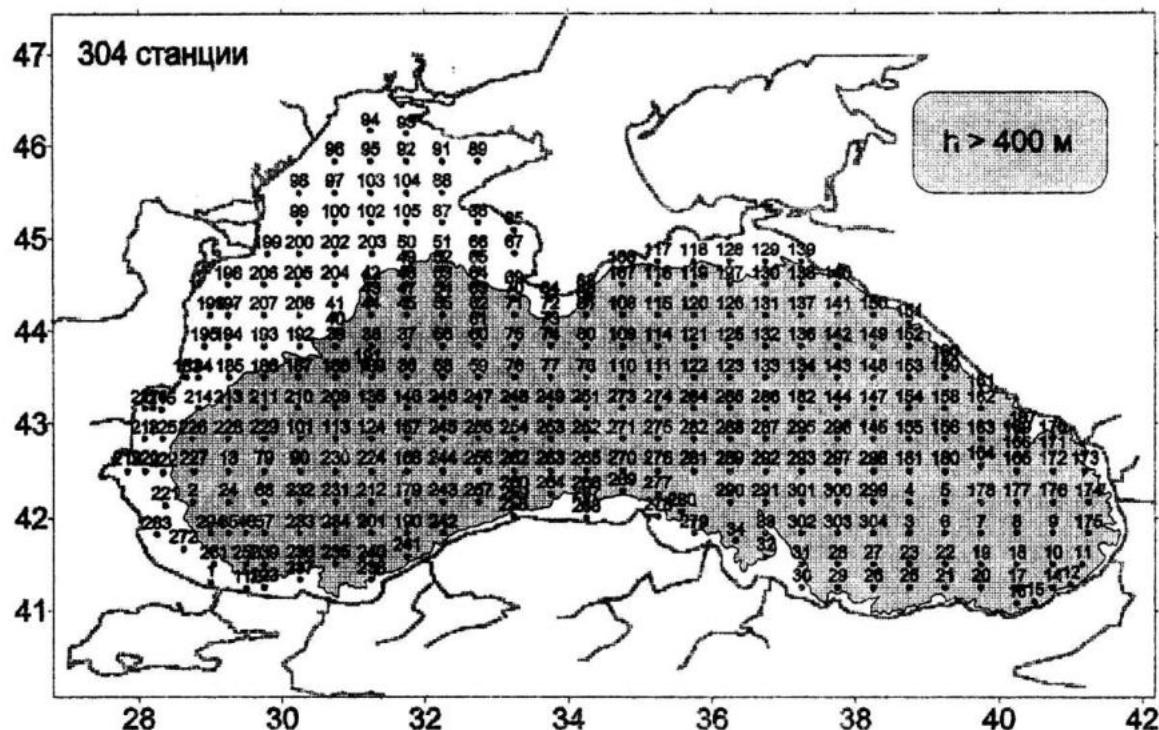


Рис.2 Полная схема съемки, июль-август 1992 г.

Из рисунка видно, что схема весьма сложна и мало пригодна для каких-либо расчетов. Такой она становится потому, что выполняется в несколько этапов, разными экспедициями и даже разными государствами.

**2. Подготовительный этап.** Программы, работающие на этом этапе, осуществляют поиск и исключение "мелководных" станций, повторных станций, имеющих одинаковые координаты, а также производят "упорядочение" станций по галсам. На выходе программ подготовительного этапа образуются массивы и файлы,

согласованные по формату с графическими пакетами GRAPHER и SURFER и с последующими обрабатывающими программами.

Известно, что в классическом динамическом методе при расчете геострофических течений в начале выбирают "нулевую поверхность", расположенную на глубине, где течения очень малы или равны нулю. Анализ профилей течения, полученных при помощи зонда-профилемера ОЛТ показывает, что в Черном море за "нулевую" поверхность может быть принята горизонтальная плоскость на глубине 500 м.

Поэтому, станции, имеющие глубину зондирования, меньшую 500 м, считаются "мелководными" и исключаются. После этого анализируются координаты оставшихся глубоководных станций. В результате, из станций, имеющих одинаковые координаты, остается та, которая лучше остальных согласуется по времени исполнения и по профилю плотности с окружающими станциями, остальные исключаются.

Оставшиеся станции, как правило, оказываются неупорядоченными по галсам, поскольку и схема, приведенная на рис.2, и проведенные исключения нарушают их временную и пространственную последовательность. Это, в свою очередь, может существенно усложнить процесс последующей интерполяции в узлы новой, более густой, регулярной сети станций.

Поэтому после исключений производится упорядочение станций на галсах по широте (или по долготе). Станциям присваиваются новые номера, возрастающие, например, в направлении с юга на север и с запада на восток. Работа по упорядочению ведется с помощью одной из программ пакета в диалоговом режиме.

Здесь осуществляется тщательный контроль информации, отбираемой для последующей обработки, путем вывода на экран дисплея и анализа профилей плотности для каждой станции. Измерения, признанные некорректными, отбраковываются или заменяются величинами, интерполированными с соответствующих горизонтов соседних станций.

По окончании этапа, с помощью пакета SURFER строится упорядоченная схема съемки, которая содержит только глубоководные, отобранные для последующих расчетов станции.

**3. Создание новой, регулярной сети станций.** Полученная на втором этапе предварительной обработки схема съемки не может использоваться для автоматизированного расчета геострофических течений, поскольку, как правило, не является прямоугольной регулярной сетью станций. Создание новой сети осуществляется по следующей методике.

С помощью пакета SURFER строится карта динамического рельефа на каком-либо характерном горизонте, например, 75 м. В процессе построения имеется возможность в диалоговом режиме выбрать число станций по долготе и по широте в новой сети. Можно выбрать и способ интерполяции исходной сети станций в новую сеть.

На основании накопленного опыта экспедиционных работ, считается оптимальным расстояние между станциями 10 - 20 миль (Булгаков Н.П., Булгаков С.Н., 1999). Еще более густая сеть выбирается при съемке микрополигонов для изучения процессов, ограниченных во времени и в пространстве, например, при исследовании вихревых образований.

Для съемки COMSBLACK 92 выбраны следующие параметры сети: число станций по долготе - 72, число станций по широте - 22. В результате получаем примерно квадратную ячейку сети с расстоянием между станциями 19.568 км по долготе и 19.579 км по

широте. При этом число узлов сети равно 1584. Новая схема съемки с на-

несенной на нее изобатой 400 м, показана на рис. 3.

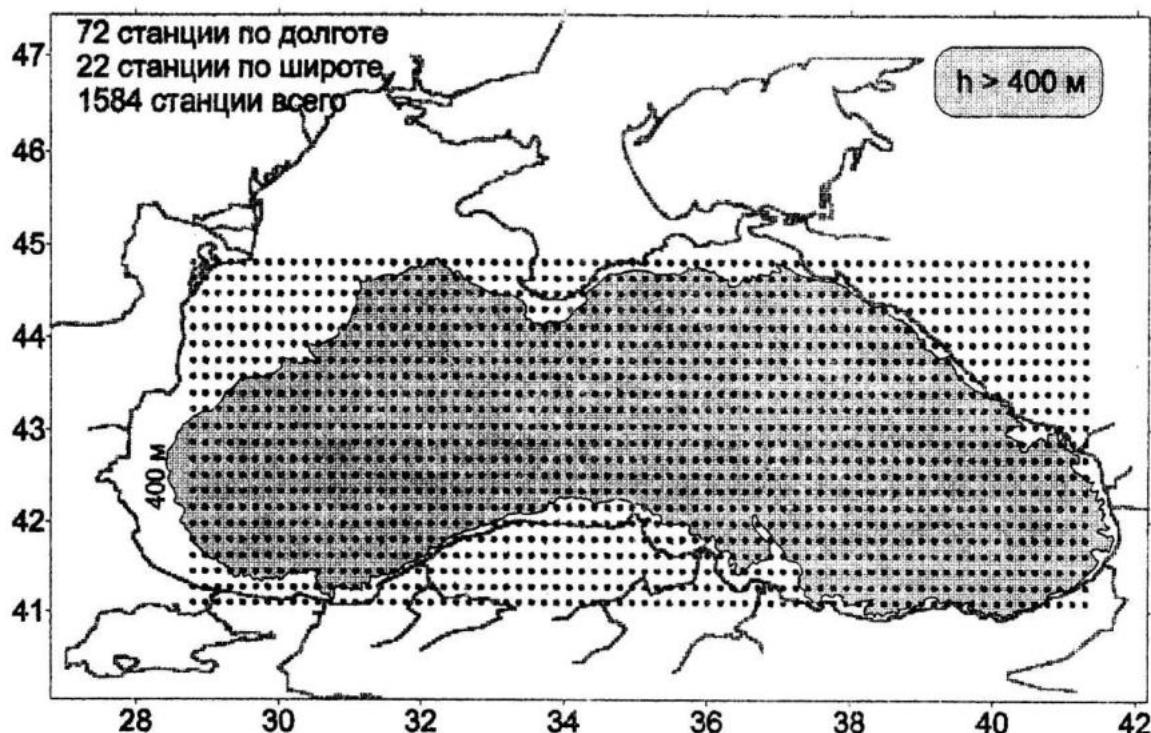


Рис.3 Расчетная схема съемки

Изобата ограничивает акваторию моря, для которой выполняются расчеты геострофических течений.

Для получения численных значений параметров в узлах новой сети станций, воспользуемся утилитой Convert, которая имеется в пакете SURFER. С ее помощью файл с расширением \*.grd превращается в файл с расширением \*.dat и становится пригодным для дальнейших расчетов в качестве файла исходных данных.

Только что описанную операцию от построения карты до конвертирования \*.grd файла можно проделать с любым физическим параметром: температурой, соленостью, плотностью и т.д. Тем самым формируются файлы ис-

ходных станций в новой регулярной сети, которые используются в расчетах горизонтальной и вертикальной структуры геострофических течений.

**4. Расчет горизонтальной структуры геострофических течений.** Для расчета геострофических течений на черноморских исследовательских полигонах научными сотрудниками А.А. Ерошко и А.Ф. Ивановым была разработана методика, позволяющая автоматизировать процесс с помощью ПЭВМ.

Суть ее в следующем. В результате гидрологической съемки имеем набор горизонтальных плоскостей, расположенных, например, через 1 м от поверхности до глубины зондирования.

Один метр - это дискретность по глубине, с которой выдают данные гидрологический зондирующий комплекс Исток-7 и профилемер ОЛТ.

После построения новой, регулярной сети станций можно приступить к расчетам. Наиболее приемлемым способом решения этой задачи авторы методики считают покомпонентный расчет параметров геострофических течений. Задается горизонт, на котором будут рассчитываться течения, например, 50 м. Для каждой станции регулярной сети рассчитывается дина-

мическая высота

После чего, для центров каждой ячейки, образованной четырьмя станциями, рассчитываются координаты, а затем меридиональные и широтные компоненты скорости геострофического течения по: (1) - (6).

Схема расчета иллюстрируется рисунком 4, на котором показаны две смежные ячейки сети. Меридиональная компонента скорости геострофического течения определяется для центра первой ячейки из соотношений (1), (2), (3).

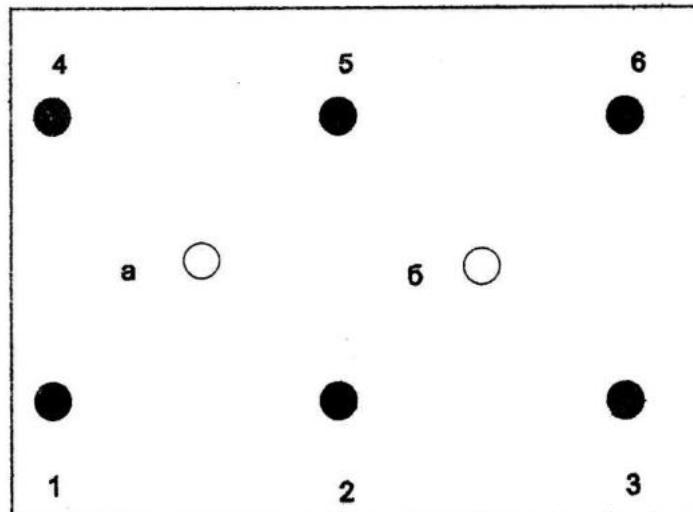


Рис. 4 Схема двух смежных ячеек сети

Широтная компонента геострофического течения в центре первой ячейки определяется из соотношений :

$$V_{el} = \frac{D_4 - D_1}{2\omega L_2 \sin \phi} \quad (4),$$

$$V_{e2} = \frac{D_5 - D_2}{2\omega L_2 \sin \phi} \quad (5),$$

$$V_{n1} = \frac{D_2 - D_1}{2\omega L_1 \sin \phi} \quad (1)$$

$$V_{n2} = \frac{D_5 - D_4}{2\omega L_1 \sin \phi} \quad (2)$$

$$V_{na} = \frac{V_{n1} + V_{n2}}{2} \quad (3)$$

$$V_{ea} = \frac{V_{el} + V_{e2}}{2}, \quad (6)$$

В формулах (1), (2), (3), (4), (5), (6) приняты следующие обозначения :

$V_{n1}$ ,  $V_{n2}$ ,  $V_{na}$  - меридиональные компоненты скорости между станциями 1 - 2, 4 - 5 и в центре первой ячейки;

$V_{el}$ ,  $V_{e2}$ ,  $V_{ea}$  - широтные компоненты скорости между станциями 4 - 1, 5 - 2, и в центре первой ячейки;

$D_1, D_2, D_4, D_5$  - динамические высоты 1, 2, 4, 5 станций;

$\omega$  - угловая скорость вращения Земли;

$L_1, L_2$  - расстояние между станциями по долготе и по широте;

$\phi$  - широта центра первой ячейки.

После обхода всех ячеек сети по долготе и по широте, получаем выходной файл с координатами центров ячеек и значениями компонент скорости в них. Модуль скорости геострофического течения в центре каждой ячейки рассчитывается по формуле:

$$V_g = \sqrt{V_n^2 + V_e^2}. \quad (7)$$

Направление геострофического течения зависит от величины и знака компонент скорости и определяется с использованием логического анализа по формулам:

$$\Phi_g = \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{V_e}{V_n}\right), \quad (8)$$

если  $V_e > 0$  и  $V_n > 0$

$$\Phi_g = 180 + \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{V_e}{V_n}\right), \quad (9)$$

если  $V_e > 0$  или  $V_e < 0$  и  $V_n < 0$

$$\Phi_g = 360 + \frac{180}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{V_e}{V_n}\right), \quad (10)$$

если  $V_e < 0$  и  $V_n > 0$

$$\Phi_g = 90^\circ, \text{ если } V_e > 0 \text{ и } V_n = 0 \quad (11)$$

$$\Phi_g = 270^\circ, \text{ если } V_e < 0 \text{ и } V_n = 0 \quad (12)$$

$$\Phi_g = 0^\circ, \text{ если } V_e = 0 \text{ и } V_n > 0 \quad (13)$$

$$\Phi_g = 180^\circ, \text{ если } V_e = 0 \text{ и } V_n < 0 \quad (14)$$

Алгоритм расчета предусматривает последовательный обход всех ячеек сети по горизонтали (по долготе) и по вертикали (по широте). После обхода получаем значения модуля и направления геострофического течения в центре каждой ячейки.

В результате расчетов будут получены горизонтальные распределения плотности, динамического рельефа и геострофического течения на горизонтах от 1 до 495 м с дискретностью 5 м.

**5. Расчет вертикальной структуры геострофических течений.** Программным путем из файлов горизонтального распределения параметров течения, динамического рельефа и плотности на каждом из 100 горизонтов формируются новые файлы. В них заносится эта же информация, только для каждой отдельной станции. В результате получаем сеть станций: 71 - по долготе и 21 - по широте, для каждой из которых с дискретностью 5 м записана информация о плотности, динамической высоте, величине и направлении компонент и модуля геострофического течения.

Используя новую схему съемки, на которой станции располагаются в центрах ячеек, с нанесенным на нее динамическим рельефом на каком-либо характерном горизонте, например, 75 м, создаем схему вертикальных разрезов по долготе, широте, или по нормали к основному течению. В нашем случае намечено 10 разрезов. Их схема показана на рисунке 5.

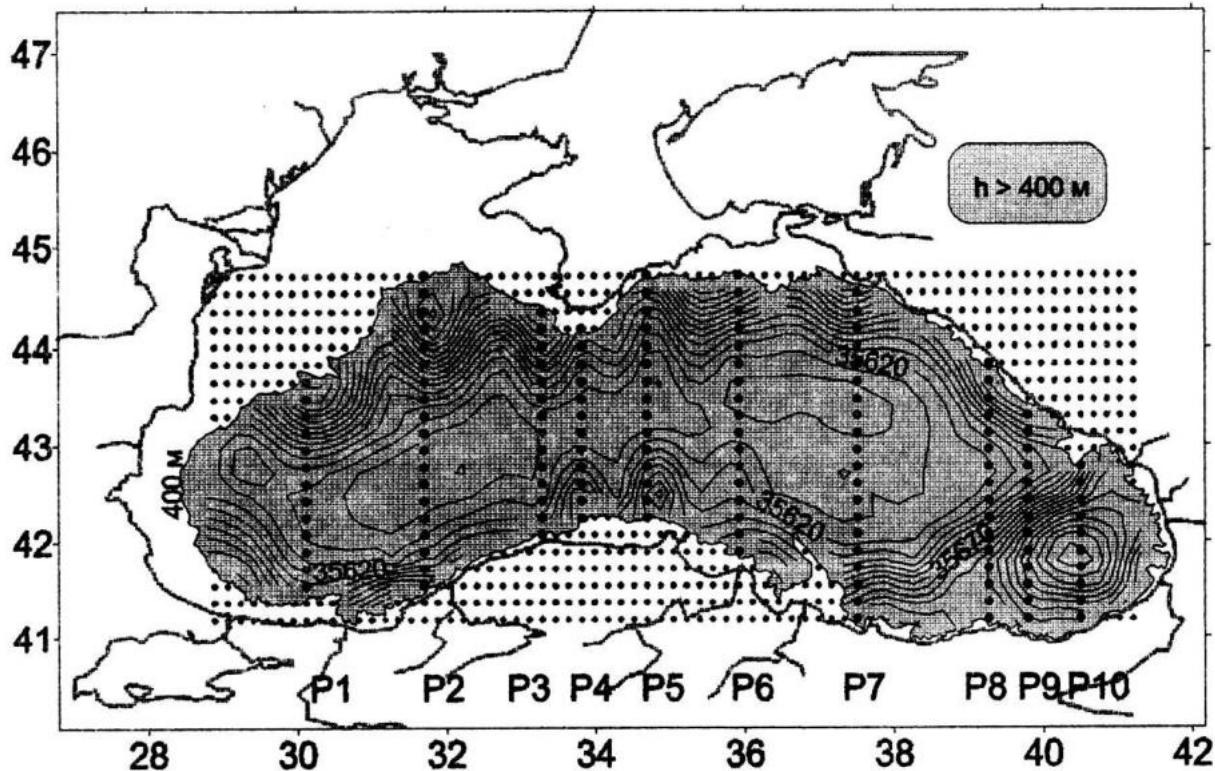


Рис.5 Динамический рельеф на горизонте 75 м и схема вертикальных разрезов

Все разрезы направлены вдоль меридианов с юга на север. Программным путем из станций, входящих в разрез, создаем выходной файл, который затем используется для построения карты разреза с помощью пакета Surfer. При этом, по оси X откладываются расстояния между станциями в километрах или в милях, а по оси Y - глубина в метрах.

В качестве параметра на карту разреза наносятся: плотность, меридиональная или широтная компоненты скорости геострофического течения, динамические высоты. На картах разрезов, нормальных к основному Черно-

морскому течению, в качестве параметра наносится модуль скорости геострофического течения.

**Результаты расчетов.** По окончании работы пакета получаем итоговые файлы, по которым строятся горизонтальные и вертикальные распределения параметров геострофического течения, динамических высот, плотности и т.д. В качестве примера на рис.6 приведена карта динамического рельефа и векторов скорости геострофического течения на горизонте 50 м., отражающая динамическую картину верхнего слоя моря на момент съемки.

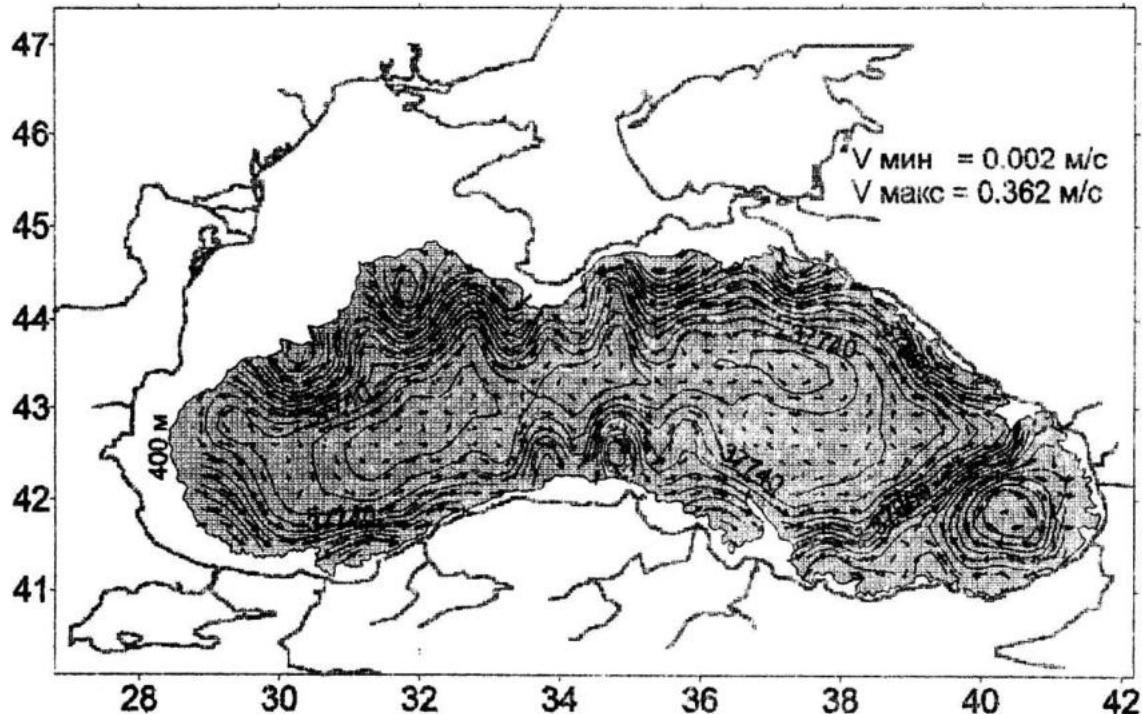


Рис. 6 Динамический рельеф и геострофические течения на горизонте 50 м.

Видно, что применяемый метод расчетов отчетливо выявляет основные элементы крупномасштабной циркуляции вод Черного моря. В первую очередь - это циклонический круговорот по всему периметру моря. Широко используемое название этого круговорота - Основное Черноморское течение (ОЧТ). В научной литературе встречается и другое название - Кольцевое Циклоническое течение (КЦТ) (Кривошея В.Г., Овчинников И.М., Титов В.Б., 1996, Титов В.Б., 1999).

ОЧТ - сильное струйное течение, имеющее сложный динамический режим. Помимо многолетних и сезонных колебаний, оно подвержено интенсивной синоптической пространственно-временной изменчивости, которая проявляется в виде меандров и прибрежных антициклонических вихрей (Титов В.Б., 1999).

Другим характерным элементом крупномасштабной циркуляции черноморских вод является антициклонический круговорот в юго-восточной части моря. В научной литературе он известен как Батумский антициклон. Он также отчетливо проявляется в результатах расчетов геострофических течений. Центр Батумского антициклонического круговорота имеет координаты:  $41.6^{\circ}$  северной широты и  $40.3^{\circ}$  восточной долготы, его средний диаметр равен примерно 110 км.

Интенсивность круговорота возрастает с глубиной и достигает максимума на горизонте 75 м. Затем с постепенным ослаблением, он прослеживается на каждом горизонте до предельной расчетной глубины 495 метров.

По каждому разрезу, показанному на рисунке 5, были рассчитаны и построены карты вертикального распре-

деления условной плотности, широтной и меридиональной компонент, а также модуля скорости геострофического течения. Рассчитаны и построены вертикальные распределения направлений перечисленных скоростей и плотности.

В качестве примера на рис.7 показано распределение широтной компоненты скорости геострофического течения на разрезе 10 (см. рис.5).

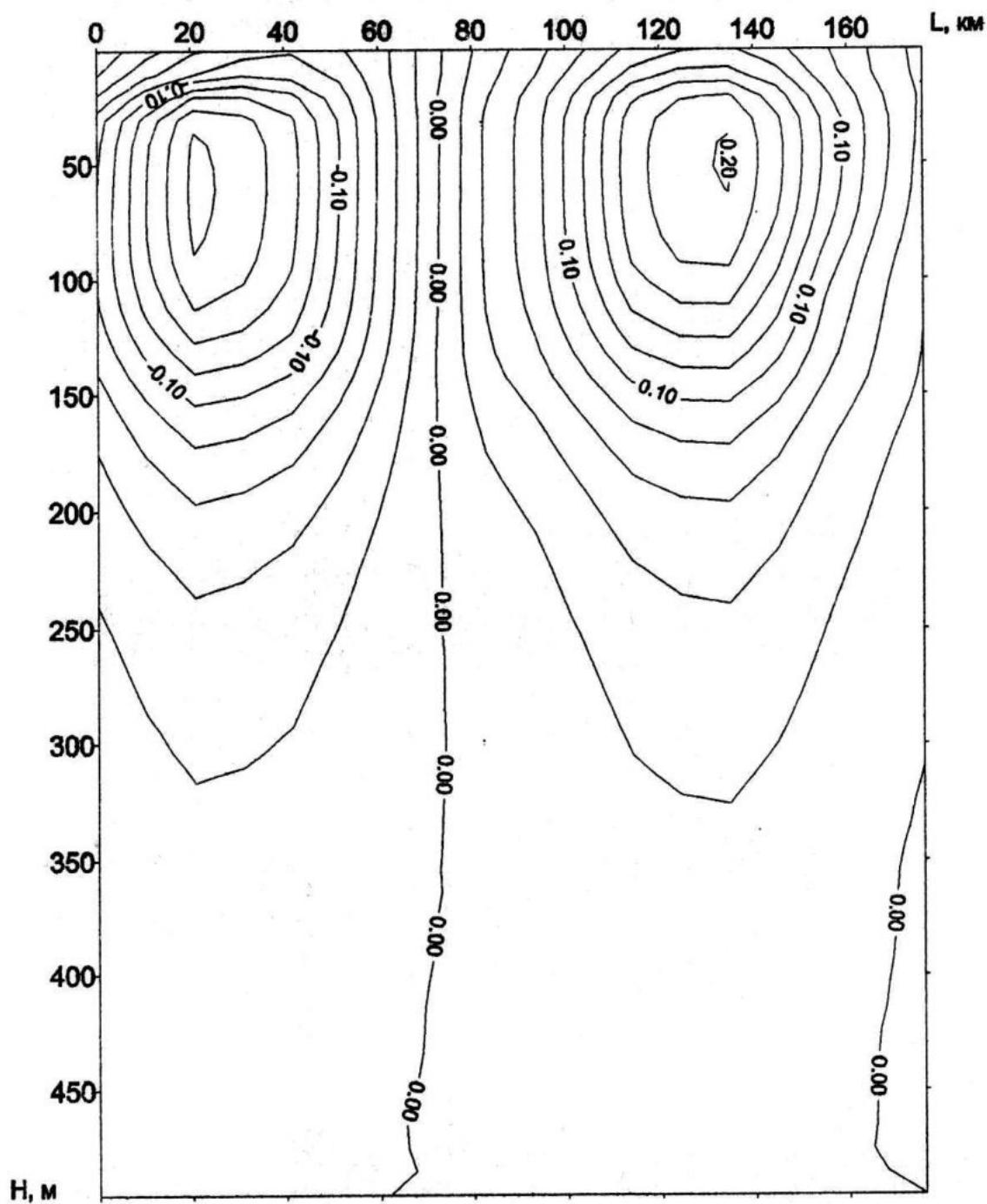


Рис.7 Широтная компонента скорости геострофического течения на разрезе 10

Длина разреза 176 км. Разрез проходит через центр батумского антициклического круговорота. На разрезе четко проявляются два потока: южный поток направлен на запад, северный - на восток. Стрежень южного потока находится в 22 км к северу от южной границы свала глубин и заглублен на 65 м. Скорость течения в стрежне 20 см/с. Ширина потока 70 км. Он прослеживается до глубины 317 м по изотахе 0.02 м/с.

Стрежень северного потока находится в 42 км к югу от северной границы свала глубин. Он заглублен на 50 м. Скорость течения в стрежне 20 см/с. Ширина потока 98 км. Поток прослеживается до глубины 325 м по изотахе 0.02 м/с.

**ВЫВОДЫ.** Предложенный способ расчета геострофических течений и созданное для его реализации методическое и программно-математическое обеспечение позволяют получить детальные характеристики горизонтальной и вертикальной структуры геострофических течений. Это, в условиях недостатка прямых измерений течений, дает возможность полнее исследовать структуру и динамику вод Черного моря и ее связь с крупномасштабными, сезонными и синоптическими процессами в атмосфере. Расчеты показывают, например, что с летним ослаблением циркуляции в атмосфере, ослабевает ОЧТ, усиливается его меандрирование и образование вихрей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булгаков Н.П., Булгаков С.Н. Вертикальная структура геострофических течений: проявление в полях плотности воды и гидростатического давления. // МГЖ, N2, 1999, С.30-47.
2. Богатко О.Н., Богуславский С.Г., Беляков Ю.М., Иванов Р.И. Поверхностные течения Черного моря. // Комплексные исследования Черного моря. Севастополь, МГИ АН УССР, 1979. С.26-33.
3. Егоров Н.И., Физическая океанография. Л: Гидрометеиздат, 1974. С.455.
4. Eroshko A.A, Kushnir V.M, Suvorov A.M. Mapping currents in the northern Black Sea using OLT-type profilers. //IEEE, 1999. Cat. N 95CH33734 p. 313-316.
5. Кривошея В.Г., Овчинников И.М., Титов В.Б. и др. Динамика вод и изменчивость температуры воды у Северо-Кавказского побережья Черного моря. // Океанология, 1996. Т36 N3 С.355-363.
6. Титов В.Б. Экспериментальные данные о меандрировании Основного Черноморского течения. // Океанология. 1993. Т33 N4. С.521-526.
7. Титов В.Б., Структура геострофических течений в северо-восточной части Черного моря. // Океанология, 1999. Т39 N1. С.46-50.